CAVITATION DES HÉLICES MARINES. COMPARAISON ENTRE LE MODÈLE ET LE RÉEL

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 17 novembre 1967

PAR S. BINDEL *

Si l'hélice marine est à bien des égards la plus simple des machines hydrauliques, elle en est certainement en même temps la plus mal connue. Cette situation paradoxale s'explique aisément si l'on considère que seuls quelques architectes navals ont à faire un projet d'hélice, alors qu'un grand nombre d'ingénieurs de toutes disciplines ont l'occasion au cours de leur carrière de s'intéresser à des installations mettant en œuvre des pompes. Le résultat de cet état de fait est que les concepts et théories relatifs aux hélices et ceux relatifs aux autres machines hydrauliques se sont développés de façon indépendante, à tel point, j'en ai personnellement l'expérience, que le dialogue devient parfois difficile : doit-on par exemple considérer une hélice en tuyère comme une pompe placée dans un circuit hydraulique? Il y a dans cette question, plus qu'un problème de langage. Aussi faut-il se féliciter des efforts constants déployés par la Société Hydrotechnique de France pour faire tomber certaines barrières et rendre à l'hydrodynamique son unité.

C'est dans cette optique que j'essaierai de me placer en parlant ici de la cavitation des hélices marines, et de façon plus précise de la comparaison entre modèle et réel : non pas donner à des spécialistes des hélices un exposé complet directement applicable à l'élaboration d'un projet, mais montrer à des hydrauliciens, turbiniéristes ou pompiers comment se posent les problèmes dans un domaine voisin du leur.

Mais, auparavant, il me faudra rappeler, à cause justement des barrières qui subsistent encore, quelles sont les caractéristiques principales de fonctionnement d'une hélice marine, et quelles sont les techniques d'investigation de la cavitation en laboratoire et à la mer.

Rappels sur le fonctionnement d'une hélice marine

a) Si, en première approximation, on néglige l'influence de la viscosité (nombre de Reynolds) et de la surface libre (nombre de Reece-Froude), les caractéristiques de fonctionnement d'une hélice peuvent être représentées par les variations, en fonction du degré de progression (*):

$$J = V/nD$$

du coefficient de poussée :

$$K_T = T/\rho n^2 D^4$$

du coefficient de couple :

$$K_Q = Q/\rho n^2 D^5$$

et du rendement :

$$\eta = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$$

(*) D : diamètre de l'hélice; V : vitesse d'avance; n : nombre de tours par unité de temps; T : poussée; Q : couple; ρ : masse spécifique du fluide.

* Ingénieur en Chef du Génie Maritime.

1/ Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une hélice : coefficient de poussée $K_T = T/Q n^2 D^4$; coefficient de couple $K_Q = Q/Q n^2 D^5$ et rendement $\eta = (J/2\pi) (K_T/K_Q)$ en fonction du degré de progression $J = V/nD$.

Ships screw characteristics: Thrust coefficient

$K_T = T/Q n^2 D^4$, torque coefficient $K_Q = Q/Q n^2 D^5$ and efficiency $\eta = (J/2\pi) (K_T/K_Q)$ in terms of $J = V/nD$.

La figure 1 indique l'allure générale des variations de K_T , K_Q et η en fonction de J . La valeur de J pour laquelle K_T s'annule est appelée pas effectif (réduit) de l'hélice : elle est un peu supérieure au rapport H/D entre le pas géométrique moyen et le diamètre D .

On notera que le coefficient de progression J de l'hélice est l'analogue du débit réduit q_n d'une pompe ou d'une turbine, le coefficient K_T étant l'analogue du coefficient de hauteur h_n et le coefficient K_Q l'analogue du coefficient de puissance.

Les courbes de fonctionnement d'une hélice se présentent donc d'une façon semblable aux courbes de fonctionnement d'une pompe axiale.

b) La cavitation qu'on peut rencontrer sur une hélice varie selon le type de celle-ci, son point de fonctionnement et le navire sur lequel elle est montée.

Le plus souvent, on rencontre les types de cavitation suivants :

- une cavitation dans le tourbillon d'extrémité qui peut être non accrochée quand elle apparaît et qui, quand le paramètre de cavitation σ (*) diminue, s'accroche généralement à la pale par une lame brillante sur le dos (**);
- une cavitation par lame sur le bord d'attaque côté dos, qui peut être différente de la lame dont il vient d'être parlée;
- une cavitation par bulles sur le dos (***);
- une cavitation sur le bord d'attaque côté face, qui se produit en général pour les sections moyennes et qui prend l'aspect soit d'une lame, soit d'un tourbillon qui suit le bord d'attaque.
- une cavitation dans le tourbillon d'ogive.

Les courbes d'apparition de ces différentes cavi-

(*) $\sigma = (p - e) / (\frac{1}{2} \rho V^2)$. Dans cette expression p désigne la pression statique et e la tension de vapeur d'eau.

(**) Le dos d'une hélice désigne l'extrados, la face désigne l'intrados.

(***) Sur les hélices réelles ces bulles isolées prennent généralement l'aspect de nuages.

tations présentent, dans le diagramme $J-\sigma$ l'allure caractéristique de la figure 2. Les cavitations sur le dos ou par tourbillons se produisent d'autant plus tôt que l'angle d'attaque des sections de pales est élevé, donc que J est petit; pour la cavitation de face, c'est l'inverse.

Les conséquences de la cavitation sont, pour l'hélice marine, les mêmes que pour toute machine hydraulique, c'est-à-dire principalement : une chute des performances (à J donné, chute de K_T , K_Q et η), des érosions, du bruit et des vibrations. Ces différents inconvénients prennent plus ou moins d'importance selon le cas envisagé mais, en gros, on peut dire que si les érosions sont une gêne dans tous les cas, le bruit de cavitation n'intéresse réellement que les bâtiments de guerre (auxquels on demande une grande discrétion acoustique) et les paquebots (pour le confort des passagers).

Un autre point qui doit être enfin noté, c'est que la cavitation est rarement permanente. Le champ des vitesses sur l'arrière d'un navire étant en effet loin d'être uniforme, une pale d'hélice rencontre, au cours de sa rotation, des conditions très variables qui se traduisent par des variations locales de J et de σ , d'où un changement de l'aspect de la cavitation avec la longueur de la pale. Derrière un gros navire par exemple, la vitesse locale d'entrée d'eau dans l'hélice peut varier de 0,1 V à V selon le point considéré.

Et même quand l'écoulement est à peu près uniforme, sur une vedette rapide par exemple, l'axe de l'hélice étant rarement parallèle à cet écoulement, tout se passe comme si la vitesse de rotation d'une section cylindrique quelconque variait avec sa longueur.

Les différentes techniques d'investigation de la cavitation de l'hélice sur modèle et à la mer

a) Sur modèle.

Si l'on veut que les essais effectués en tunnel représentent aussi exactement que possible ce qui se passe sur le réel, il faut en particulier que les conditions géométriques soient respectées. Mais les dimensions des tunnels de cavitation, qui sont des installations coûteuses, sont en général trop petites pour recevoir un modèle entier de carène; on doit donc alors se contenter de travailler sur l'hélice en l'isolant du reste de la carène.

Mais, comme on vient de le dire, l'écoulement incident sur l'hélice d'un navire n'est pas uniforme, aussi cherche-t-on des palliatifs pour réaliser une similitude géométrique au moins approximative. Dans le cas d'une hélice axiale, on installera dans le tunnel sur l'avant de l'hélice un « générateur de sillage » (constitué par exemple dans le tunnel du Bassin d'Essais des Carènes par des grillages superposés) de manière à avoir dans le plan de l'hélice la même vitesse axiale que derrière la carène. Dans le cas d'une ligne d'arbres inclinée, le mieux sera de pouvoir disposer dans le tunnel une ligne d'arbres inclinée. Ce ne sont là que des palliatifs, mais tellement importants que, dans l'état actuel de la technique, on ne peut plus considérer

comme représentatifs du réel des essais qui les ignoreraient.

Le modèle étant défini, deux paramètres importants sont laissés au choix de l'expérimentateur : la vitesse du courant d'eau et la teneur en air de l'eau.

En ce qui concerne la vitesse, elle n'est arbitraire que dans la mesure où les conditions de similitude sont multiples et contradictoires : nombre de Reech-Froude, de Reynolds, de Weber ne pouvant être conservés simultanément, il faut bien adopter une valeur, mais laquelle prendre ? Le principe directeur d'un tel choix est simple : il faut, d'une façon générale, adopter la similitude qui, compte tenu éventuellement de corrections calculées, conduit à l'effet d'échelle le plus réduit entre le modèle et le réel.

D'après ce qu'on sait expérimentalement sur la similitude entre le modèle et le réel, il semble que ce soit le non-respect du nombre de Reynolds qui soit à l'origine des principales divergences entre le modèle et le réel. La règle la plus souvent adoptée est alors simple : on travaille sur modèle à la vitesse maximale permise par l'installation.

En ce qui concerne la teneur en air de l'eau, la question se pose de façon simple : si la teneur en air est petite, les effets d'échelle modèle-réel sont grands ; si la teneur en air est grande, il apparaît, quand on abaisse la pression, des bulles gazeuses de diamètre tel que l'observation visuelle de la cavitation de vapeur en est rendue difficile, sinon impossible. La teneur en air optimale dépend de l'installation : dans le tunnel du Bassin d'essais des Carènes, elle paraît se situer autour de 0,3 fois la teneur correspondant à la saturation à la pression atmosphérique.

Ces conditions de similitude étant fixées, c'est en général à l'œil qu'on détermine de la cavitation et qu'on en suit le développement.

Les observations acoustiques sont parfois employées pour déterminer l'apparition de la cavitation, bien qu'elles ne permettent pas une localisation de celle-ci. La signification qu'on peut attribuer aux mesures acoustiques en régime de cavitation développée est douteuse, car le niveau de bruit est grandement influencé à la fois par la présence du tunnel, qui donne des réflexions parasites, et par les bulles de gaz en suspension, qui amortissent le bruit d'autant plus que la pression est plus petite.

On pourrait songer à mesurer les érosions du métal constituant l'hélice modèle mais, d'une part la vitesse du courant d'eau est trop petite, d'autre part le temps d'essai est trop court pour qu'on ait en général la possibilité de voir quoi que ce soit.

La détermination de la chute des performances, couple, poussée, rendement, constitue enfin une mesure d'intérêt évident, mais il y a lieu de noter que cette chute ne se produit que pour certains types de cavitation, et encore quand ils sont suffisamment développés.

b) A la mer.

L'observation visuelle est en théorie la technique la plus adéquate pour détecter l'apparition et le développement de la cavitation, mais, malheureusement, elle requiert un équipement spécial et un

arrangement spécial de la coque ; aussi n'a-t-elle été jusqu'à présent que rarement employée.

L'observation peut être faite soit directement par l'œil (à travers des hublots ou des périscopes), soit en utilisant des moyens indirects tels que la photographie, le cinéma ou la télévision. Chaque fois que cela est possible, l'observation à l'œil semble préférable, en particulier pour déceler l'apparition de la cavitation, mais la photographie et le cinéma sont d'un intérêt particulier pour matérialiser le développement de la cavitation, par exemple avec la vitesse ou avec la position des pales. Quant à la télévision, son pouvoir de résolution n'est pas aussi bon et elle pose des problèmes de synchronisation dans le cas d'une hélice.

D'autres difficultés de mise en œuvre existent que nous nous bornerons à énumérer : quasi-impossibilité de voir le phénomène dans sa totalité, nécessité d'opérer dans une zone géographique où l'eau est transparente, difficulté d'observation à partir de hublots insuffisamment immergés.

Le bruit qui accompagne la cavitation est, comme nous l'avons déjà dit, une de ses manifestations particulièrement gênantes dans certains cas. Ce peut en être aussi un signe mesurable. Mais l'observation acoustique présente, à la mer comme sur modèle, deux défauts : il est d'une part impossible de déterminer l'apparition de la cavitation quand le niveau de bruit ambiant est élevé (cas général des hélices, sauf pour les sous-marins), il est d'autre part très difficile de localiser la cavitation de façon précise et en particulier de déterminer de quel type de cavitation il s'agit.

Les dommages matériels subis par les hélices ou les appendices constituent, pour la plupart des armateurs, l'effet le plus gênant de la cavitation ; ils sont en même temps un indice utile permettant d'affirmer l'existence de cavitation. Cependant, à l'opposé des phénomènes visuels ou acoustiques, les érosions ne concernent pas tous les types de cavitation (par exemple le tourbillon d'extrémité ou

2/ Allure des courbes d'apparition de différents types de cavitation. $\sigma = (p - e) / (\frac{1}{2} \rho V^2)$ en fonction de $J = V/nD$.
Incipient cavitation curves. $\sigma = (p - e) / (\frac{1}{2} \rho V^2)$ versus $J = V/nD$.

d'ogive d'une hélice quand aucun appendice ne se trouve placé derrière celle-ci). Elles ne sont d'autre part sensibles que lorsque la cavitation est suffisamment développée et depuis suffisamment longtemps; elles ne caractérisent donc pas le fonctionnement de l'hélice à un instant donné, mais sont le résultat de toute son histoire antérieure. De plus le degré d'érosion dépend très largement du matériau utilisé.

Historiquement, ce sont les effets de la cavitation sur les performances d'un destroyer anglais, le « *Daring* », qui, à la fin du siècle dernier, ont attiré l'attention sur le phénomène de cavitation des hélices et qui ont amené Parsons à construire le premier tunnel pour essais sur modèle. Ces effets cons-

tituent un autre critère de cavitation, au sujet duquel on peut faire les mêmes remarques que pour le modèle; de plus, il est souvent difficile de dire quelles auraient été les performances du navire en l'absence de cavitation et donc d'apprécier effectivement l'altération des performances.

Esquisse d'une corrélation entre modèle et réel

Avant d'aborder l'examen de la corrélation modèle-réel proprement dite, deux remarques doivent encore être faites, qui ne sont pas spéciales aux hélices mais qui intéressent toutes les machines hydrauliques.

La première remarque est d'ordre théorique. Comparer entre eux un modèle et un navire suppose, cela va de soi, qu'on s'intéresse à des choses comparables, donc de même nature et mesurables : la puissance du modèle, son roulis, son rayon de giration peuvent être comparés directement à la puissance, au roulis ou au rayon de giration du navire, toutes grandeurs qui intéressent effectivement l'armateur et qui peuvent être mesurées à la mer assez aisément. Mais la cavitation, elle, est un phénomène qui n'est ni mesurable, ni toujours permanent et qui, de surcroît, n'est à la mer généralement accessible que par ses conséquences : érosions, bruits, chute de rendement; et ces conséquences sont elles-mêmes difficiles à mesurer et peuvent être dues en partie à d'autres phénomènes que la cavitation.

C'est pourquoi comparer entre elles la cavitation du modèle et celle du réel se réduit dans la plupart des cas à essayer de découvrir si un comportement apparemment anormal du navire ne peut pas être expliqué par la cavitation et, ce diagnostic étant fait, à essayer de découvrir, d'après les essais du modèle, si ce comportement était ou non prévisible.

La seconde remarque est d'ordre pratique : c'est la constatation que le nombre de cas qui peuvent faire l'objet d'une corrélation valable sont très peu nombreux, à cause des difficultés expérimentales, à cause du manque d'observations systématiques, à cause des différences souvent trop grandes entre les conditions d'essais sur modèle et à la mer, à cause du secret commercial ou militaire. Nous devons donc nous borner ici à passer en revue quelques cas intéressants.

Observations visuelles

a) Le premier document décrivant la cavitation à la mer sur des hélices et des appendices de ligne d'arbres est le mémoire présenté par Weeks, de l'Admiralty Experiment Works, Haslar, au Symposium sur la cavitation en 1955. A ce titre, il a un intérêt indéniable et a probablement été à l'origine d'essais analogues entrepris par la suite dans plusieurs pays. Il montre par exemple l'ampleur que peut prendre la cavitation sur un destroyer ou une vedette rapide et le rôle des bras supports d'arbres dont la cavitation peut induire une cavi-

3/ Comparaison de la cavitation de l'hélice tribord d'un bâtiment de guerre hollandais, à la mer (schémas du bas) et au tunnel (schémas du haut) (Reproduction d'une figure communiquée à la 11^e ITTC par le Bassin de Wageningen).

Cavitation on the starboard screw of a Dutch warship at sea (below) and in the tunnel (above). (Reproduced from a figure transmitted by Wageningen's Tank to 11th ITTC.)

4/ Courbes d'apparition de la cavitation sur l'hélice tribord de l'escorteur A. Les courbes sont relatives au modèle ($D = 33$ cm) et les points, au réel.

Incipient cavitation curves for the starboard screw of escort vessel A. Curves refer to model ($D = 33$ cm) and points to real ship.

5

6 a

6 b

5/ Cavitation de l'hélice tribord de l'escorteur B. La pale 2, observée au moment où elle remonte ($\varphi \sim 270^\circ$), est le siège d'une cavitation sur le bord d'attaque côté face. La pale 1, vue par la tranche au moment où elle est verticale ($\varphi \sim 0^\circ$), est le siège d'une cavitation par tourbillon d'extrémité.

Port screw cavitation, escort vessel B. Blade 2 is on its way up ($\varphi \sim 270^\circ$) and is cavitating on its face leading edge. Blade 1 is seen end-on in the vertical position ($\varphi \sim 0^\circ$) and is undergoing tip vortex cavitation.

6/ a et b : Cavitation sur les bras et sur l'hélice tribord de l'escorteur B pendant une giration du bâtiment. Le bras oblique (photographie b) est le siège d'une cavitation par lame dégénérant en nuages qui viennent frapper l'hélice (photographie a) et provoquent des claquements violents à la fréquence de passage des pales.

a and b : Cavitation on shaft brackets and starboard screw of escort vessel B during a turn. Sheet cavitation on the strut (photograph b) is degenerating into clouds impinging on the screw (photograph a) and causing loud reports as each blade passes.

tation sur les hélices. Mais en ce qui concerne la corrélation entre le modèle et le réel, il ne donne toutefois que des indications qualitatives.

Les conclusions de Weeks concernant des bâtiments de guerre rapides paraissent à peu près confirmées par les observations faites ailleurs, en particulier au Canada, aux Pays-Bas et en France.

Les observations qui ont été faites dans notre pays sur deux escorteurs méritent en particulier d'être rapportées plus en détail parce qu'elles ont ultérieurement été suivies par des essais sur modèle très poussés dans les conditions jugées les plus satisfaisantes.

Le premier escorteur, que nous appellerons A, a donné lieu à de nombreuses observations en mer (en 1960 et 1965), non seulement dans les conditions normales de fonctionnement (les deux hélices en marche), mais également dans des conditions extrêmes de charge (une ligne d'arbres entraînée par sillage, l'autre fournissant toute la poussée).

Les essais au Bassin ont été exécutés sur deux hélices modèles, dont l'une de diamètre normal (23,2 cm) et l'autre de grand diamètre (33 cm).

Le tableau ci-contre résume les résultats obtenus en ce qui concerne l'apparition de la cavitation : il donne, pour chaque type de cavitation, le rapport V_m/V_p entre la vitesse V_m mesurée à la mer et la vitesse V_p prévue d'après les essais au tunnel.

Pour $J = V/nD = 0,96$, aucune cavitation de face n'a été observée sur les modèles. La figure 4, qui concerne les essais effectués avec l'hélice de 33 cm montre que, pour $V/nD = 1$, il y a une chute brusque du σ correspondant à ce type de cavitation. Il est alors permis de penser que, si la valeur de V/nD pour l'hélice réelle n'avait pas été aussi pro-

ESCORTEUR A		Valeurs de V_m/V_p pour l'hélice tribord		
TYPE DE CAVITATION	CONDI- TIONS DE FONCTION- NEMENT	$J = \frac{V}{nD}$	V_m/V_p	
			D'après le grand modèle D = 33 cm	D'après le modèle normal D = 23,2 cm
Tourbillon d'extré- mité (longitude $\varphi = + 30^\circ$ C).	(1)	0,96	0,67	0,79
	(2)	0,83	0,71	0,70
Tourbillon d'ogive.	(1)	0,96	1,28	1,21
	(2)	0,83	1,09	1,13
Lame sur le bord d'entrée côté face. (ef)	(1)	0,96	rien sur le modèle	
	(3)	1,39	0,64	0,66

(1) Les deux hélices en fonction.

(2) Hélice tribord en fonction, hélice babord entraînée par sillage.

(3) Hélice tribord entraînée par sillage, hélice babord en fonction.

che de V/nD correspondant à cette chute, une valeur d'environ 0,8 aurait été obtenue pour le rapport V_m/V_p .

Les observations sur l'escorteur B ont été exécutées en 1961, les deux hélices étant normalement en fonction.

Les rapports V_m/V_p obtenus d'après les essais effectués sur un modèle de 24,7 cm de diamètre sont les suivants :

- pour la cavitation par tourbillon d'extrémité. $V_m/V_p = 0,78$
- pour la cavitation par tourbillon d'ogive (non précis) $V_m/V_p > 1$
- pour la cavitation par lame sur le bord d'entrée côté face $V_m/V_p = 0,80$

Les essais exécutés par le Bassin d'Essais des Carènes dans des conditions qu'on peut estimer satisfaisantes confirment donc eux aussi les indications données par Weeks. Ils montrent d'autre part que *les différents types de cavitation conduisent à des effets d'échelle différents en ce qui concerne leur vitesse d'apparition* : la cavitation par tourbillon d'extrémité et la cavitation par lame apparaissent plus tôt que prévu (V_m/V_p de l'ordre de 0,75) ; au contraire, la cavitation par tourbillon d'ogive apparaît plus tard (V_m/V_p de l'ordre de 1,15).

b) Les observations qui ont été faites jusqu'à présent sur des navires de commerce à une ligne d'arbres concernent surtout le point de fonctionnement normal de l'hélice : elles ne visent pas tant à déterminer la vitesse d'apparition de la cavitation (le bruit occasionné par cette apparition n'est pas un élément tellement important pour un armateur) qu'à voir si, dans les conditions d'exploitation du navire, les figures de cavitation observées à la mer sont semblables aux figures de cavitation observées au tunnel.

Deux séries d'essais méritent d'être mentionnées. La première série d'essais a été exécutée en Suède sur un pétrolier de 50 000 t muni successivement d'une hélice à cinq, puis à six pales (fig. 7). De cette série d'essais, « il ressort l'impression générale qu'il y a un bon accord entre les figures de cavitation du modèle et du réel si les essais sur modèle sont exécutés dans une distribution de sillage irrégulière obtenue d'après les mesures effectuées derrière le modèle de carène ».

La deuxième série d'essais a été exécutée en Allemagne sur le navire de recherche « Meteor ». Des essais sur modèle, non publiés, ont été exécutés à Hambourg, derrière un générateur de sillage reproduisant le sillage mesuré derrière le modèle. « Ils montrent un accord raisonnable entre les figures de cavitation sur le modèle et sur le réel. »

Observations acoustiques

Les observations acoustiques à la mer sont assez fréquentes mais, faites la plupart du temps pour le compte des marines militaires, elles ne donnent pas lieu à publication ; de plus, il est rare que des mesures analogues soient faites au tunnel.

Un cas intéressant signalé par le Bassin de Wageningen concerne deux navires identiques, mais équipés d'hélices à pales orientables différentes. L'une des hélices était particulièrement bruyante, tandis que l'autre se comportait de façon tout à fait nor-

male. Des essais effectués au tunnel derrière un générateur de sillage donnèrent la même différence : alors que le modèle correspondant à l'hélice bruyante se révéla également très bruyant (dans la gamme de fréquence correspondant à la rotation des pales, nombre de tours multiplié par le nombre de pales), le modèle de l'hélice silencieuse fut trouvé silencieux. La raison de cette différence de comportement ne fut pas aperçue sur le moment, mais des recherches ultérieures montrèrent que le bruit de crépitement constaté aussi bien à la mer qu'au tunnel correspondait au fait qu'un nuage de vapeur quittait une pale dans une certaine position pour venir frapper la pale suivante.

Cette constatation est à rapprocher de la constatation faite en France au cours des essais d'escorteurs dont il a déjà été parlé. Au cours des girations des bâtiments, on a entendu des claquements très violents, se produisant à peu près à la fréquence de passage des pales. On a observé que, du fait de l'incidence élevée du courant, les bras sont alors sujets à une cavitation intense qui se présente sous forme d'une lame donnant naissance à des nuages de vapeur et l'on a pu noter la coïncidence entre les bruits et le fait que des nuages quittaient les bras pour venir frapper une pale d'hélice. La figure 6 illustre bien le phénomène.

Erosions

C'est probablement sur le problème des érosions que la littérature est la plus abondante, car les observations sur le réel sont aisées à faire, mais à cause de la difficulté qu'il y a à obtenir des érosions du modèle, les érosions du réel sont généralement comparées aux figures de cavitation observées sur le modèle.

a) En ce qui concerne les dommages matériels subis par les hélices axiales, tous les rapports présentés concluent à l'existence d'un accord raisonnable entre les figures d'érosion sur le navire et les figures de cavitation sur le modèle, pourvu que les essais sur modèle soient exécutés dans un écoulement non uniforme simulant le sillage mesuré derrière la carène. Mais, l'interprétation n'est pas toujours facile, même si l'on ne tient pas compte de la nature du matériau constituant l'hélice. D'après les essais sur modèle, le risque d'érosion semble en effet dépendre non seulement du type de cavitation, mais aussi de son étendue et du temps pendant lequel ce type de cavitation est rencontré pendant une révolution (fig. 8).

Un cas intéressant signalé par le Bassin de Wageningen à l'International Towing Tank Conference concerne un navire pour lequel on a pu retrouver sur modèle non seulement une figure de cavitation, mais également des érosions semblables aux érosions à la mer ; la déformation en « bec de casserole » du bord de fuite ne paraît toutefois pas avoir été reproduite sur le modèle.

b) Un type d'érosion plus particulier aux hélices des bâtiments rapides est l'érosion du dos des pales près du moyeu. Signalé par plusieurs auteurs, il paraît être dû à l'inclinaison très forte des lignes de courant sur l'axe des hélices : des essais en

a $\sigma = 12,53 \quad J = 0,523$

a et b/ Navire ($\alpha = 15^\circ$).
Actual ship ($\alpha = 15^\circ$).

b $\sigma = 9,26 \quad J = 0,506$ **c**

c et d/ Modèle.
Model.

d

7/ Cavitation de l'hélice à 6 pales d'un pétrolier de 50 000 t pour deux degrés de charge différents (photographies communiquées par le Bassin de Göteborg).
Cavitation affecting the six-bladed screw of a 50 000-ton tanker at two different load conditions (photographs by courtesy of the Göteborg Tank).

MODÈLE, FIGURES DE CAVITATION/MODEL, CAVITATION PATTERNS:

Conditions : pleine charge, $V = 18$ nd, $N = 113,6$ tr/mn, $W = 0,29$, $J = 0,64$, $\alpha = 7,0$.

Conditions : full load, $V = 18$ knots, $N = 113,6$ r.p.m., $W = 0,29$, $J = 0,64$, $\alpha = 7,0$.

REEL, FIGURES D'ÉROSION / REAL SHIP, EROSION PATTERNS:

Pale n° 1 après deux ans (les autres pales sont semblables).
N° 1 blade after two years (the other blades are in a similar condition).

8/ Comparaison des figures d'érosion sur l'hélice d'un navire de commerce à ligne d'arbres unique et des figures de cavitation sur le modèle.

Erosion patterns on the propeller of a single-screw merchant ship and cavitation patterns on its model.

9/ Comparaison des dommages matériels subis par l'hélice d'un pétrolier de 21 000 t et des figures de cavitation du modèle.

Cavitation damage on a 21 000-ton tanker screw and cavitation patterns on its model.

(a)

(b)

(c)

10/ Dessin initial
(Td et Bd sont similaires).
Original design
(Td and Bd similar).

Dessin modifié
(aucune érosion sur le réel).
Modified design
(no erosion on prototype).

Comparaison des figures d'érosion sur l'hélice tribord d'un destroyer japonais et des figures de cavitation sur le modèle à 32 nœuds.

Erosion patterns on the starboard screw of a Japanese destroyer and cavitation patterns on its model at 32 knots.

tunnel montrent en effet que cette inclinaison provoque la formation périodique sur le dos des pales d'un nuage de cavitation quand elles sont dans leur mouvement descendant, c'est-à-dire quand l'angle d'incidence est le plus grand. Un changement de tracé supprimant, au moins partiellement, ce nuage sur modèle s'est, dans un cas au moins, révélé satisfaisant en ce qui concerne les érosions de l'hélice réelle (fig. 10).

Effets sur les performances propulsives

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, il n'y a pratiquement pas de publication qui traite de la comparaison entre l'altération des performances propulsives sur modèle et sur réel. Cela peut tenir au fait que d'une part les mesures faites à la mer intéressent surtout des bâtiments de guerre rapides et d'autre part au fait qu'il est difficile de dire, pour le navire, quelles auraient été les performances s'il n'y avait pas eu de cavitation.

L'exemple qui nous paraisse le plus intéressant à signaler est celui d'une vedette rapide suédoise à trois lignes d'arbres.

Des essais ont été exécutés sur l'hélice centrale

dont on faisait varier, à vitesse donnée, le nombre de tours; de cette façon, on a pu effectivement déterminer, pour une valeur donnée du paramètre de cavitation, les variations des coefficients de couple et de poussée en fonction du degré de progression. Comme les hélices de la vedette étaient à pales orientables, on a pu de plus étudier les variations des performances en fonction du pas.

La comparaison entre les essais à la mer et les essais sur modèle (exécutés dans le tunnel de Kamewa) montrent une assez grande dispersion ($\pm 15\%$ environ sur les couples et sur les poussées), mais aucun effet systématique en fonction des paramètres (degré de progression, paramètre de cavitation, pas) n'a pu être mis en évidence et l'écart moyen entre les coefficients de couple (ou de poussée) du modèle et du réel reste inférieur à 1%.

Au moins pour un état de cavitation bien développé, il semble donc y avoir un accord raisonnable en moyenne entre le modèle et le réel. Cette conclusion paraît d'ailleurs être celle d'autres expérimentateurs, à condition que les essais sur modèle soient exécutés sur une ligne d'arbres oblique.

Conclusions

Si le nombre de cas présentés ne nous autorise évidemment pas à tirer de conclusions définitives quant à la corrélation entre la cavitation de l'hélice réelle et celle du modèle, quelques traits généraux paraissent cependant pouvoir être dégagés.

Tout d'abord, il ne peut y avoir de corrélation valable que si les essais sur modèle sont exécutés dans des conditions qui représentent le mieux possible les conditions à la mer, et qui respectent en particulier la répartition de la vitesse locale : par exemple, si l'on ne peut installer dans le tunnel un modèle entier de carène, il faut qu'une hélice axiale soit montée derrière un générateur de sillage et une hélice latérale sur une ligne d'arbres inclinée. Les essais sur modèle doivent d'autre part être conduits avec la vitesse la plus grande possible (pour diminuer les effets d'échelle dus au non-respect du nombre de Reynolds) et avec une teneur en air de l'eau suffisante (de façon que les « noyaux » qui donnent naissance à la cavitation soient suffisants en nombre et en diamètre).

Ces précautions étant prises, il subsiste néanmoins un certain désaccord entre le modèle et le réel en ce qui concerne la vitesse à laquelle apparaît la cavitation, désaccord qui dépend d'ailleurs du type de cavitation concerné. Si la cavitation par lame et la cavitation par tourbillon d'extrémité apparaissent plus tôt que prévu, en revanche, la cavitation par tourbillon d'ogive semble apparaître un peu plus tard.

En ce qui concerne la cavitation développée, l'accord paraît au contraire satisfaisant, qu'il s'agisse des figures de cavitation, des figures d'érosion ou des performances propulsives. Il faut cependant remarquer que les érosions sont le résultat de toute l'histoire antérieure du navire et qu'elles dépendent très largement du matériau employé, de telle sorte que les prévisions en ce domaine sont par nature sujettes à caution.

Quelques expériences effectuées sur des appendices fixes de navires paraissent montrer que les conclusions précédentes restent valables. Le sont-elles aussi dans le cas des autres machines hydrauliques, pompes et turbines? C'est là une question à laquelle la discussion qui doit maintenant s'instaurer permettra peut-être de donner des éléments de réponse.

Bibliographie

- [1] BINDEL (S.). — Comparison between model and ship cavitation. An assessment of available data. Cavitation Committee Report. 11th International Towing Tank Conference, Tokyo (octobre 1966).
- [2] WEEKS (A.F.). — Ship propeller cavitation problems. Cavitation in hydrodynamic. Proceedings of a Symposium held at the NPL (septembre 1955).
- [3] VAN DE VOORDE (C.B.). — A full-scale model correlation investigation on propeller cavitation. *I.S.P.*, vol. 8, n° 82 (1961).
- [4] LINDGREN (H.) et JOHNSON (C.A.). — Studies of cavitation patterns on tanker ship propellers. Symposium on Testing Techniques in Ship Cavitation Research, Trondheim (mai-juin 1967).
- [5] ALBRECHT (K.) et HEINZEL (S.). — Kavitationsbeobachtungen am Propeller des Forschungsschiffes Meteor. *S.T.G.* (novembre 1965).
- [6] PASCAULT (J.). — Réflexions sur l'érosion de cavitation observée sur des hélices de cargos et de pétroliers à une seule ligne d'arbres. *A.T.M.A.*, vol. 60 (1960).
- [7] LINDGREN (H.). — Cavitation tests with merchant ship propellers. *I.E.S.S.*, vol. 104, part. 7 (1960-61) et *S.S.P.A.*, publication n° 48 (1961).
- [8] LINDGREN (H.) et NORRBIN (H.H.). — Model tests and ship correlation for a cargo liner. Propulsion, cavitation, seagoing and manoeuvring. *R.I.N.A.*, vol. 104 (1962).
- [9] TANIGUCHI (K.) et TANIBAYASHI (H.). — Root erosion on the propellers of a destroyer. *S.N.A.J.* (1965).
- [10] MAIOLI (P.G.). — Cavitazione delle eliche nella zona del raccordo. Ministero Della Difesa. Comitato per I Progetti Delle Navi. *Annale*, n° 5 (1966).
- [11] TANIGUCHI (K.) et CHIBA (N.). — Investigation into the propeller cavitation in oblique flow. *O.N.R.*, contract n° 4214 (00).

Discussion

Président : J. DUPOUR

En ouvrant la séance, M. le Président rappelle les liens qui unissent la Société Hydrotechnique de France à l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques; à cette occasion, il exprime sa gratitude à M. CHEVALIER qui réussit parfaitement à mener de pair ses importantes fonctions au Laboratoire de Chatou et ses activités de secrétaire de la « Section Machines », tant à la S.H.F. qu'à l'A.I.R.H.

M. CHEVALIER présente le compte rendu des activités de la « Section Machines » de l'A.I.R.H.

M. le Président remercie M. CHEVALIER pour son exposé très précis, et qui ne donne pas lieu à discussion; il présente ensuite, en ces termes, les trois communications qui sont à l'ordre du jour de cette séance :

« Je crois que, malgré la diversité apparente de leurs sujets, il y a lieu de présenter ensemble ces trois communications, d'abord parce qu'elles concernent un même phénomène, qui est l'érosion due à la cavitation, ensuite parce que, à des degrés divers, et par des approches différentes, elles répondent à une même préoccupation : la prédiction des dommages de cavitation dans les machines et ouvrages hydrauliques.

« Ce matin, nous avons vu sur l'écran quelques dommages dus à la cavitation sur des ouvrages en béton; on nous a dit, et c'est bien vrai, qu'ils sont relativement peu fréquents et, la plupart du temps, d'importance limitée. Heureusement, il en est à peu près de même pour les turbines hydrauliques; mais dans ce dernier domaine, la difficulté me semble plus grande, car pour diverses raisons économiques, on est amené à construire des machines hydrauliques — parmi lesquelles j'inclus peut-être, tout d'abord, les hélices propulsives — pour des modes de fonctionnement tels que, parfois les conditions limites de cavitation se trouvent dépassées.

« Bien que le phénomène de cavitation soit connu depuis très longtemps, et malgré les très importants travaux de recherche qui ont été poursuivis dans les laboratoires et sur les machines industrielles, on est encore très désarmé, à l'heure actuelle, pour prévoir avec précision, ce que seront les dommages de cavitation d'une machine donnée, dans des conditions déterminées d'exploitation et ceci même pour des machines qui sont conçues et exploitées de façon traditionnelle. Mais le problème devient encore plus ardu quand on aborde des applications techniques qui ne sont plus exac-

tement le prolongement du passé. Il semble que ce soit le cas des navires très rapides, civils ou militaires, et tout particulièrement des très grands navires à plusieurs lignes d'arbres pour lesquels il n'est pas possible d'installer une hélice unique suffisamment grande (M. BINDEL nous le dira probablement mieux que je ne puis le faire); c'est aussi le cas des turbines bulbe — dont on a parlé longuement hier —; pour des raisons économiques, on est amené à construire ces machines avec des puissances spécifiques et des vitesses spécifiques qui auraient paru absolument inaccessibles il y a seulement une quinzaine d'années. C'est le cas aussi pour les machines réversibles, destinées aux usines d'accumulation par pompage et pour les pompes d'accumulation dans les groupes ternaies. Ces machines, implantées d'une façon nettement favorable au point de vue cavitation, seront exploitées un petit nombre d'heures par an; aussi les maîtres d'œuvre estiment-ils que l'on devrait adopter pour elles des vitesses spécifiques notablement plus élevées que celles ordinairement admises pour les turbines classiques.

« Je cite là trois domaines où il s'avère nécessaire de savoir exactement ce qui se passe en matière d'érosion de cavitation.

« Comment peut-on procéder pour prévoir avec une meilleure certitude, et faire progresser aussi la conception hydrodynamique des machines afin de répondre à ces besoins nouveaux? Trois voies me paraissent possibles, mais, comme toujours, toute classification est un peu arbitraire :

« La première voie, celle que nous suivons et que nous avons suivie longtemps (et il en reste des traces tangibles dans les travaux de notre Société), est celle qui consiste à faire des observations sur modèle réduit en essayant de recueillir le maximum possible d'informations (je pense qu'on y reviendra au cours des discussions), et à rechercher des corrélations aussi sûres que possible entre ce qui a été observé sur le modèle et ce qu'on a observé en matière d'érosion de cavitation sur les grandes machines : c'est ce dont va nous parler M. BINDEL en ce qui concerne les hélices marines.

« Une deuxième voie consiste, par des expériences systématiques, à faire varier les paramètres présumés influencer l'érosion de cavitation et à recueillir, par une voie purement expérimentale, les lois qui régissent l'érosion de cavitation. Cette question est évoquée d'une façon extrêmement

claire dans la communication de M. CANAVELIS. Cette démarche pour atteindre les lois de l'érosion de cavitation implique que l'on connaisse suffisamment bien le mécanisme de cavitation pour être assuré de ne prendre en compte que des paramètres significatifs. A ce propos, on peut dire un mot de l'effet d'échelle, sujet difficile car il met en jeu de très nombreux paramètres concernant, soit l'hydrodynamique du phénomène, soit, et c'est beaucoup plus compliqué, les propriétés physiques de l'eau ou du liquide au sein duquel se produit la cavitation, soit encore la façon dont la physique de l'eau alliée à une certaine hydrodynamique, provoque *in fine* l'érosion. Autrement dit, cette approche purement expérimentale ne peut être féconde qu'à condition d'en savoir suffisamment long sur le mécanisme intime du phénomène d'érosion par cavitation; c'est ce mécanisme qui fera l'objet de la troisième communication.

« Sur ce sujet très vaste et très difficile, M. CHINCHOLLE nous apporte des idées nouvelles et originales que je tiens à ne pas déflorer maintenant.

« En terminant cette présentation bien imparfaite, je voudrais souligner l'extrême importance pratique et technologique de ces recherches quelle que soit la voie d'approche choisie; c'est seulement par ces voies que l'on peut espérer prédire avec certitude, c'est-à-dire apporter des éléments de sécurité et de fiabilité absolument nécessaires dans les grandes réalisations, qu'il s'agisse de la marine ou de l'hydroélectricité. Je pense qu'aucune de ces voies ne peut aboutir pleinement et suffisamment sans être copieusement étayée par les deux autres.

« J'ai bon espoir que, dans un nombre d'années que je ne saurais dire, la connaissance intime du processus d'érosion aboutira à des lois simples — que les ingénieurs pourront utiliser — concernant la relation qui existe entre les propriétés physiques de l'eau et l'intensité d'érosion de cavitation pour des conditions hydrodynamiques données. Mais avant que cet aboutissement très souhaitable soit atteint, il est certainement utile et fructueux de poursuivre les investigations dans les deux autres voies.

Discussion de la communication de M. BINDEL :

M. le Président remercie M. BINDEL et ouvre la discussion.

Se référant à un exposé fait à la même tribune par M. HUGUENIN et traitant de la possibilité d'établir des relations entre certains types de cavitation et leurs effets ou manifestations : érosions, bruits, baisses de rendement, etc. M. CANAVELIS demande si M. BINDEL a pu mettre sur pied quelques relations du même genre pour les hélices marines.

M. BINDEL signale que l'on a pu observer sur des safrans de stabilisation d'un navire des phénomènes de cavitation qui se présentaient à la fois sous forme de « lame » sur le bord d'attaque et sous forme d'un « tourbillon d'extrémité », analogue à celui observé sur une aile portante; le bruit entendu alors était beaucoup plus important pour la « lame » que pour le tourbillon. Dans le cas d'un « tourbillon d'ogive », le bruit que l'on observe est un bruit blanc beaucoup plus difficile à mettre en évidence que ceux qui se produisent à la fréquence de passage des pales (comme par exemple, le bruit dû à un nuage de bulles se détachant d'une pale dans une position donnée de celle-ci).

M. CANAVELIS se demande également s'il n'y a pas une corrélation entre les différentes figures de cavitation et les érosions correspondantes.

M. le Président intervient pour constater que la communication de M. BINDEL est, en fait, la suite de travaux antérieurs de la « Section Machines », déjà présentés par M. HUGUENIN, d'une part, et M. BEAUFRÈRE, d'autre part, et auxquels M. BINDEL lui-même avait participé.

Sur la demande de M. le Président, M. BERGERON — président de la « Section Machines » — marque son accord pour que ce travail soit repris en réunion de la section afin de se rendre compte dans quelle mesure les observations nouvelles apportées par M. BINDEL confirment ou non celles qui avaient déjà été rassemblées par M. HUGUENIN.

M. BERGERON se demande, si au point de vue de la cavitation, les conditions de fonctionnement des hélices marines ne sont pas assez différentes de celles des pompes et des turbines du fait qu'en un point de la pale, la valeur du paramètre σ varie largement au cours d'une révolution entre le moment où ce point est le plus près de la surface libre et celui où il s'en trouve le plus éloigné. Cela doit entraîner une modification des figures de cavitation et éventuellement des lâchers de bulles.

M. CANAVELIS observe qu'on doit avoir un phénomène analogue dans le cas des grandes turbines bulbes.

M. BINDEL fait remarquer que le cas d'une lame de cavitation dont la configuration reste constante est un cas idéal, rarement rencontré en pratique.

M. CANAVELIS demande si on a pu constater, en ce qui concerne l'effet d'échelle, une influence du nombre de Reynolds de l'écoulement, de la valeur du paramètre σ de Thoma et de la teneur en air de l'eau.

M. BINDEL répond que cela dépend essentiellement du type de cavitation considéré. Pour la cavitation par lame et la cavitation par tourbillon d'extrémité, quand le nombre de Reynolds R augmente σ augmente, et quand la teneur en air augmente, σ augmente également; dans les deux cas, cette augmentation de σ est loin d'atteindre une valeur asymptotique. Lorsqu'on passe du modèle au réel, on constate que σ augmente effectivement de façon sensible. Pour la cavitation par tourbillon d'ogive, on observe au modèle que la cavitation décroît quand la vitesse croît et, quand on passe du modèle au réel, il en est de même. D'une manière générale, on peut donc dire que les phénomènes suivent une même tendance sur le modèle lui-même et au cours du passage du modèle au réel.

En revanche, la cavitation par bulles, sur modèle, ne change guère, ni avec la vitesse, ni avec la teneur en air; mais il a été très difficile jusqu'à présent d'observer ce qui se passe à la mer sur ce type de cavitation qui est souvent masqué par d'autres.

M. CANAVELIS pense que si le rapprochement entre les hélices marines et les autres machines n'est pas évident, des difficultés semblables se font jour lorsque l'on cherche à comparer modèle et prototype (différences de dimensions géométriques, de qualité des eaux, etc.).

Bien que des exposés aient déjà été faits sur ce sujet, M. CANAVELIS souhaiterait avoir l'avis de spécialistes, s'il s'en trouve parmi l'assistance.

M. le Président rappelle que M. GIRAUD et M. CAMPBAS avaient présenté trois ou quatre cas de comparaison entre modèle et prototype, compte tenu des informations dont ils disposaient.

M. GIRAUD précise qu'il s'agissait de turbines Francis; on avait pu observer sur le modèle, des phénomènes de torches sous la roue, et l'on avait réussi à détecter au moyen d'une sonde, les zones gazeuses et les zones liquides dans la machine industrielle; la concordance était bonne.

D'autre part, dans les turbines hydrauliques, dit M. GIRAUD, on s'impose d'effectuer des essais avec un nombre de Reynolds minimal. Peut-on dire dans le cas des essais d'hélices en tunnel, quel est le nombre de Reynolds minimal « significatif ».

M. BINDEL fait observer que pour certains types de cavitation (lame ou tourbillon) on ne peut pratiquement pas atteindre sur modèle le nombre de Reynolds significatif, c'est-à-dire le nombre de Reynolds au-dessus duquel la valeur de l'apparition serait indépendante de la vitesse. La meilleure solution consiste alors à effectuer les essais avec le nombre de Reynolds maximal que permet l'installation.

M. WEGNER pose les deux questions suivantes :

1° Avez-vous entrepris des essais sur les navires à ailes portantes, qui ont l'intérêt de présenter des formes plus simples que les hélices?

2° L'eau de mer n'est-elle pas plus facile à « simuler » sur modèle que les eaux douces? Autrement dit :

a) La qualité de l'eau de mer est-elle constante?

b) Cette qualité n'est-elle pas moins altérée que celle de l'eau douce par les manipulations?

M. BINDEL répond négativement à la première question. Puis, il signale que l'on a pu constater sur des sous-marins que les propriétés de l'eau de mer, au point de vue de la cavitation, paraissent varier d'une façon significative quand l'immersion varie. D'une façon générale, l'eau de mer est tout aussi difficile à utiliser que l'eau douce; d'ailleurs, c'est l'eau douce qui est toujours utilisée pour les essais sur modèle.

M. le Président pense même que l'eau de mer est un milieu plus compliqué, plus variable et plus divers que l'eau naturelle des rivières.

M. OSTERWALDER rappelle des résultats d'essais de cavitation. En étudiant les rapports entre l'apparition de la cavitation et la destruction du matériau, il faut tenir comp-

te des expériences sur les pompes et les turbines axiales. Certaines figures de cavitation, comme celles qui apparaissent à l'implanture et à l'entrée des pales d'une turbine Kaplan, conduisent rarement à des dommages, alors que d'autres sont beaucoup plus actives (par exemple, cavitation marginale).

De plus la question se pose de savoir si la loi de Knapp [$G = f(w^2)$] est aussi valable pour les pales (étant donné que la vitesse relative w change avec le rayon).

D'ailleurs, des recherches sur l'érosion par cavitation des hélices marines ont été exécutées dans les laboratoires de la « Nederlandsch Scheepsbouwkundig Proefstation, Wageningen » sous la direction de M. J.D. van Manen. On a classé de la façon suivante les divers types de cavitation :

- cavitation de lame;
- cavitation des bulles;
- cavitation des nuages.

M. BINDEL répond que pour la cavitation sur le dos des pales, les conclusions tirées des essais sur les hélices marines sont à peu près comparables à celles déduites de l'expérience sur les turbines; quand il y a risque grave d'érosion, on se trouve généralement en présence sur le modèle non seulement d'une lame, mais aussi de petits nuages de bulles.

La cavitation de face est une cavitation, très sévère vis-à-vis des érosions, qui se produit lorsque l'angle d'attaque des sections est trop petit; elle se manifeste par une lame sur le bord d'entrée et quelquefois par un petit tourbillon qui suit le bord d'entrée.

M. DOMERGUE demande si l'on constate bien une réduction de l'érosion de cavitation lorsque la pression augmente (ce qui est le cas des sous-marins en plongée) et lorsque la température décroît (cas des navires circulant en mers froides par rapport à ceux naviguant en régions tropicales); quel est le choix des matériaux constituant l'hélice pour une meilleure résistance à l'intensité de l'érosion.

M. BINDEL répond que dans le cas des sous-marins, la

cavitation diminue quand la pression, c'est-à-dire quand l'immersion augmente. Mais on ne dispose guère de renseignements sur l'influence de la température. Pour la réalisation de l'hélice, on utilise de plus en plus les cupro-aluminiums qui se sont révélés être les plus résistants des alliages vis-à-vis de la cavitation.

M. CHEVALIER revient sur la constatation faite par M. BINDEL suivant laquelle, pour deux figures de cavitation sur trois, l'effet d'échelle entre modèle et prototype est toujours négatif. Cette constatation, dit-il, n'a pas été faite à ma connaissance sur les turbines qui, elles, fonctionnent loin de leur régime de début de cavitation; peut-on tirer des conclusions semblables pour les pompes qui généralement fonctionnent près du début de cavitation? Existe-t-il une telle corrélation, aussi évidente, dans les essais de comparaison des cavitations — sur modèle et sur prototypes — dans les pompes?

M. BERGERON répond qu'à sa connaissance, dans le domaine des pompes, il n'a jamais été possible — pour des raisons de prix de revient — de faire en vraie grandeur un contrôle quelque peu précis des résultats obtenus sur modèle.

M. HUGUENIN apporte quelques remarques au sujet de l'une des diapositives illustrant l'exposé de M. BINDEL.

M. HUGUENIN propose une explication aux différences d'érosion de cavitation (mises en lumière sur la figure 10 du texte de M. BINDEL). Dans la figure 10 *b*, le collapse se fait sur la pale, ce qui entraîne l'érosion de celle-ci; dans la figure 10 *c*, le collapse a lieu hors de la pale, aussi ne constate-t-on aucune érosion; on pourrait aussi penser à un phénomène de supercavitation très bruyant mais non érosif.

M. le Président remercie M. BINDEL qui a apporté des informations intéressantes sur le comportement des hélices vis-à-vis de la cavitation; elles s'ajoutent aux travaux déjà présentés par MM. HUGUENIN, CAMPAS et GIRAUD dans le domaine des turbines; il souhaite voir bientôt traiter les mêmes problèmes en ce qui concerne les pompes.

LA HOUILLE BLANCHE

A L'ÉTRANGER

Bureaux d'abonnement et de vente

AUSTRALIE

Sydney N.S.W.

GRAHAME BOOK COMPANY : 39-49, Martin Place.

BRÉSIL et AMÉRIQUE DU SUD

Rio de Janeiro

« S.O.G.E.C.O. », José Luis Garcia Renalès : Avenida Rio Branco, 9, Sala 218.

CANADA

Montréal 8.PQ

LIBRAIRIE LEMEAC (Messageries France-Canada) : 371, Ouest Avenue Laurier.

ESPAGNE

Madrid

J. DIAS DE SANTOS : Lagasca n° 38.

Madrid

LIBRERIA VILLEGAS : Preciados, 46.

GRANDE-BRETAGNE

London W.C.2.

W.M. DAWSON & SONS LIMITED : Cannon House, Macklin Street.

London W.1.

I.R. MAXWELL Co. : 4-5, Fitzroy Square.

HOLLANDE

Amsterdam C.

MEULENHOFF & CIE (Librairie) : Beulingstraat, 2-4.

La Haye

MARTINUS NIJHOFF : 9, Lange Voorhout.

HONGRIE

Budapest 62

KULTURA P.O.B. 149.

INDES

Calcutta 16

FRANCE-ARTS, 33-34 Park Mansions, Park Street.

ITALIE

Bologna

TECHNA: Via San Felice, 28, Casella Postale 503.

JAPON

Tokyo

MARUZEN Co. : 6, Tori-Nichome, Nihonbashi, P.O. Box 605.

MEXIQUE

Mexico D.F.

LIBRERIA VILLEGAS MEXICANA : Santa Ma., La Redonda, n° 209-9.

Mexico D.F.

MANUEL BONILLA (Librairie) : Tiber 38-201.

NOUVELLE-ZÉLANDE

Auckland-Wellington C.2.

R. HILL & SONS : Matlock House, 32, Quay Street.

PORTUGAL

Lisboa

LIVRARIA BERTRAND : 73, Rua Garret.

SUÈDE

Stockholm

A.B. HENRIK LINDSTAHL'S BOKHANDEL : Odengatan, 22.

SUISSE

Lausanne

S.P.E.S., S.A. Librairie et Editions techniques, 1, rue de la Paix.

TCHÉCOSLOVAQUIE

Praha 2

ARTIA : V° Smeckach, 30.

Praha 1

ORBIS (Import-Export) : Narodin, 37.

TURQUIE

Istanbul

LIBRAIRIE HACHETTE : 469, Istiklal Caddesi, Beyoglu.

U.S.A.

New York

MOORE-COTTRELL SUBSCRIPTION AGENCIES INC. : North Cohocton.

VENEZUELA

Caracas

LIBRERIA VILLEGAS VENEZOLANA, Avenida Urdaneta, Esquina Ibarra, Edificio Riera.